

Dimensions des câbles

1. Introduction

Avant leur commercialisation, les câbles et les accessoires doivent avoir passé avec succès les essais de type et les essais de longue durée selon les normes nationales et internationales:

- câbles de réseau à basse tension selon HD 603 S1, Part 7, section E et Part 8, section B
- câble de réseau à moyenne tension selon HD 620 S2, Part 10, 11, section N

Brugg Cables possède une longue expérience dans la technique des matériaux ainsi que dans les tests électriques et mécaniques pour le développement des produits, la production, la pose, le montage et la mise en service. L'assurance de qualité selon les normes ISO 9001 et 14001 garantit de plus des procédés de développement et de production fiables. Toutes ces sécurités garantissent que, durant leur durée d'utilisation de 30 à 40 ans, les systèmes de câbles remplissent sans problème leurs tâches électriques, en transportant l'énergie, de la production jusque chez le consommateur.

Brugg Cables produit des câbles et des accessoires pour une utilisation de 1 kV à 500 kV; cette partie du catalogue pour basse et moyenne tension se focalise sur les tensions jusqu'à 30 kV. Pour des cas spéciaux, nos ingénieurs sont à disposition avec leurs programmes de calculs spécifiques. Avec les données de type de pose, de puissance à transporter, de tension, de courant de court-circuit, de système d'écran et de type d'installation, on peut calculer avec une précision suffisante la charge électrique, les chutes de tension, les pertes, etc.

1.1 Durée de vie et fiabilité

Par durée de vie d'une installation de câbles, on entend sa durée d'utilisation. Les composants sont installés pour leur durée d'utilisation totale. La durée de vie peut être influencée de façon négative par une surtension passagère, des courts-circuits, des températures trop élevées, des sollicitations mécaniques, de même que par un affaissement du sol, l'eau et l'humidité, des influences chimiques ainsi que des rongeurs. La sécurité de l'installation est garantie par le respect des limites thermiques, des courants de courts-circuits de courte durée ainsi que de la tension d'utilisation.

1.2 Pertes et rentabilité

Les pertes et la rentabilité d'une installation de câblage sont intimement liées et difficilement séparables. Les câbles peuvent être utilisés jusqu'aux limites de leurs capacités, c'est dans ce but qu'ils ont été développés et produits. Les conducteurs PEN des réseaux de câbles à basse tension sont mis à la terre des deux côtés, afin de garantir une meilleure sécurité et pour avoir l'assurance d'une mise à la terre multiple dans un réseau mis à la terre. Les

écrans de câbles assemblés de moyenne tension jusqu'à 240 mm² ou des câbles unipolaires MT de même section sont préférablement mis à la terre en faisceaux des deux côtés pour des raisons de sécurité de contact. A partir d'une section de 300 mm², afin d'éviter les pertes dues à l'écran, ils sont mis à la terre de façon avantageuse d'un seul côté et protégés du côté ouvert par une gaine parasurtension. De cette façon, on atteint des buts économiques et écologiques positifs. Du point de vue de la rentabilité, il ne faut pas seulement tenir compte du coût des câblages, mais aussi de toute l'installation.

2. Dimensionnement d'installations de basse et moyenne tension

Les calculs de charge électrique sont effectués pour les deux niveaux de tension selon IEC 60287 d'après le type de pose. Les données suivantes sont nécessaires pour le dimensionnement:

- tension nominale et de fonctionnement
- valeur de la tension de choc
- puissance à transporter ou courant nominal
- puissance de court-circuit ou courant de court-circuit avec durée
- type de fonctionnement: charge permanente ou industrielle
- type de pose
- température ambiante
- résistance thermique spécifique du sol

2.1 Résistance électrique de l'âme, capacités, inductances

Les formules et les valeurs tabulées peuvent être trouvées dans les données des produits. Les formules de calcul se trouvent en chiffre 4 et les formules.

2.2 Pertes dans les câbles

Pour les câbles de basse et moyenne tension, on ne doit pratiquement tenir compte que des pertes ohmiques et d'écran. Les pertes diélectriques sont très faibles comparées aux pertes ohmiques. Les pertes ohmiques sont dépendantes du matériel et de la température. Pour le calcul de $P = I^2 \cdot R$, il faut ajuster la valeur de la résistance du conducteur donné pour 20 °C à celle pour la température d'utilisation T du câble:

$$R_T = R_{20} \cdot \{1 + \alpha (T - 20^\circ\text{C})\}$$
$$\alpha = 0.00393 \text{ pour le cuivre}$$
$$= 0.00403 \text{ pour l'aluminium}$$

2.3 Tracé de l'intensité du champ et courant de charge

Les câbles ont une isolation pouvant être considérée comme un condensateur cylindrique homogène. L'isola-

Informations générales

tion diélectrique d'un câble a un tracé d'intensité de champ selon la figure 1 et dépend de la formule suivante:

$$E_x = \frac{U_0}{r_x \cdot \ln(r_a/r_i)} \quad [\text{kV/mm}]$$

U_0 = tension de phase appliquée [kV]

r_x = rayon au point x [mm]

r_a = rayon extérieur au-dessus de l'isolation [mm]

r_i = rayon au-dessus de la limite intérieure du champ électrique [mm]

Le gradient de potentiel (champ électrique) est maximal à la surface du semi-conducteur intérieur ($r_x = r_i$) et minimal à la surface de l'isolation (sous le semi-conducteur extérieur, $r_x = r_a$).

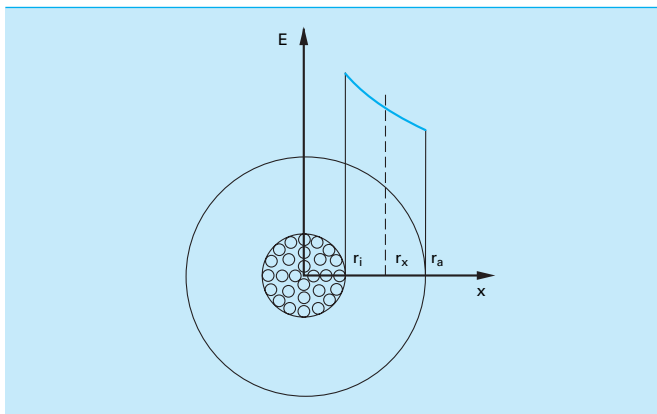


Figure 1: Tracé radial de l'intensité du champ.

2.4 Câbles de réseaux à basse tension

Les câbles de réseaux à basse tension sont utilisés dans deux types de réseaux:

- Réseaux BT avec protection par mise à la terre
- Réseaux BT avec mise au neutre

Des types de câbles différents sont employés préférentiellement dans chaque système:

- Dans des réseaux avec protection par mise à la terre: câble quadripolaire type 3LPE avec armure légère à forte. Le conducteur PE isolé sert de conducteur neutre, l'armure de conducteur de protection, en commun avec un système de conduction d'eau connecté électriquement.
- Dans des réseaux avec protection par mise à la terre multiple: câble quadripolaire type 3L avec un conducteur extérieur concentrique, type Ceander. Le conducteur extérieur sert de conducteur PEN entre les prises de terre des bâtiments.
- La protection par mise à la terre est en grande partie relayée par la protection par mise au neutre à cause de l'interruption électrique du système de conduction d'eau.
- Des câbles quadripolaires avec armure peuvent être utilisés sans problème dans un réseau à mise à la terre multiple en connectant le conducteur neutre à l'armure.

- La situation est plus avantageuse avec les câbles Ceander dans un réseau à protection par mise à la terre: le conducteur extérieur concentrique ne doit être utilisé qu'en conducteur PEN.

2.5 Câble de réseau à moyenne tension

Les câbles à moyenne tension sont munis d'un écran métallique qui doit être mis à la terre. Lors de l'utilisation se produisent des pertes dues à l'écran par:

- des courants magnétiques
- des courants parasites
- des courants d'écran compensateurs à la suite de tensions d'écran longitudinales induites

Les écrans des câbles à moyenne tension sont normalement mis à la terre des deux côtés. Par la tension d'écran longitudinale induite U_{iS} , un courant d'écran I_S circule aux deux mises à la terre de l'écran, créant ainsi les pertes d'écran. Le courant d'écran se calcule par:

$$I_S = \frac{U_{iS}}{Z_S}$$

Z_S est l'impédance d'écran qui se calcule par la formule suivante:

$$Z_S = \sqrt{R_S^2 + X_S^2}$$

La résistance d'écran peut être calculée à partir de la géométrie et de la conductivité du matériel de l'écran. La réactance d'écran X_S pour des câbles posés en triangle est:

$$X_S = 1.26 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot \ln\left(\frac{2s}{d_S}\right) \quad [\Omega/\text{km}]$$

f = fréquence

s = distance à l'axe [mm]

d_S = diamètre moyen de l'écran [mm]

La tension d'écran est:

$$U_S = Z_S \cdot I \cdot L \quad [\text{V}]$$

I = courant du conducteur [A]

L = longueur du câble [km]

Les pertes d'écran se calculent avec la formule:

$$P_S = I_S^2 \cdot R_S$$

Une vue d'ensemble des pertes de fonctionnement est donnée dans les chapitres suivants.

Informations générales

2.6 Câbles triphasés assemblés ou câbles unipolaires en faisceaux avec écran en fils de cuivre

Comparé aux pertes totales, ces câbles n'ont, jusqu'à une section conductrice de 240 mm² avec mise à la terre des deux côtés, que de faibles pertes par écran. A partir de 300 mm², on n'utilise pratiquement plus que des câbles unipolaires, devant être posés soit en triangle soit en nappe. Lors d'une mise à terre des deux côtés de l'écran, les pertes d'écran de ces câbles à grosse section dépassent la limite de 5 % par rapport aux pertes totales. Pour ce type de câbles, une mise à la terre d'un seul côté de l'écran est conseillée, afin de réduire les pertes. La pose à distance de câbles unipolaires accompagnée de la mise à la terre des deux côtés de l'écran est fortement déconseillée, car cela peut mener à des pertes par écran de 20 à 40 % des pertes totales. Des écrans métalliques, des jonctions ou des extrémités de câbles libres doivent être isolés de façon adéquate lors de la mise à terre de l'écran d'un seul côté et doivent être équipés de gaines parasurtension, afin de les protéger contre des surtensions de commutation ou atmosphériques. Le désavantage d'une mise à la terre d'un seul côté est l'augmentation de l'impédance neutre qui peut être maintenue basse par l'ajout d'une bande de mise à la terre supplémentaire.

3. Bases pour les calculs

3.1 Types d'utilisation des câbles

Charge continue

Lors d'une charge continue, la charge est maintenue à une valeur constante toute la journée et toute l'année et ainsi un courant constant circule dans le câble. Ce type de charge est peu utilisé dans les réseaux à basse et moyenne tension. Le plus souvent, ce type de charge est utilisé dans des installations de production et des sous-stations.

Charge industrielle

Dans des réseaux de distribution, la charge est généralement dépendante du temps. Pour l'aménagement d'une installation de câblage, il est avantageux de connaître la courbe de charge sur 24 h. Avec celle-ci, on peut déterminer le facteur de charge (Angl.: load factor, All.: Belastungsgrad) comme le rapport à la charge maximale. Avec une tension de réseau constante, le courant varie. Le facteur de charge peut être calculé avec une intégration linéaire:

$$BG = \frac{1}{24h \cdot I_{max}} \cdot \int_0^{24h} I(t) \cdot dt$$

Pour le calcul de charge de câbles enterrés, le facteur d'utilisation est significatif. Ce facteur prend en considération l'inertie de l'évacuation de la chaleur dans le sol. On le calcule à partir de l'intégrale quadratique (Angl.: loss factor, All.: Verlustleistungsfaktor).

$$LF = \frac{1}{24h \cdot I_{max}} \cdot \int_0^{24h} I^2(t) \cdot dt$$

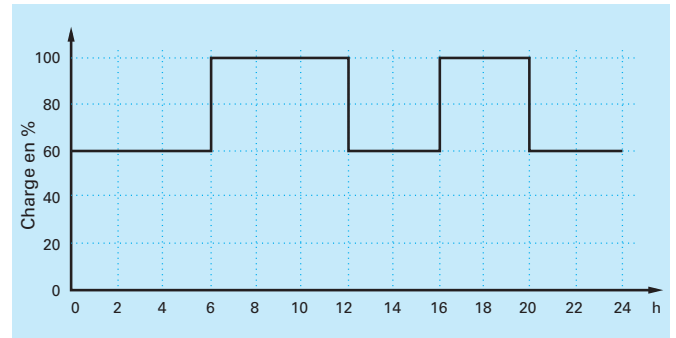


Figure 2: Courbe de charge journalière pour charge industrielle, i.e. 10 h à 100 % et 14 h à 60 % courant nominal.

3.2 Températures limites

Les valeurs maximales des températures des conducteurs dépendent du matériel isolant utilisé et de la durée de vie désirée.

Câble à basse tension et câble à moyenne tension	Températures permises des conducteurs		
	Service de longue durée °C *	Régime de secours °C **	Cas de court-circuit °C ***
Polyéthylène XLPE réticulé et EPR réticulé (Ethylène-Propylène-Rubber)	90	110	250

* Température de transition permanente au sol (surface du câble, tube, bloc de tubes): 50 °C

** Régime de secours durant 6 à 8 h par jour et au maximum 100 h par année

*** Températures limites selon IEC 60986 et HD 620 S2: jusqu'à 5 s

3.3 Détermination des courts-circuits autorisés

La durée du court-circuit est composée des temps de déclenchement propre au disjoncteur de protection et du relais. Le courant de court-circuit est calculé à partir des données du réseau suivantes:

$$I_{CC} = \frac{S_{CC}}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

I_{CC} = courant de court-circuit

S_{CC} = puissance de court-circuit

U_n = tension nominale composée

Informations générales

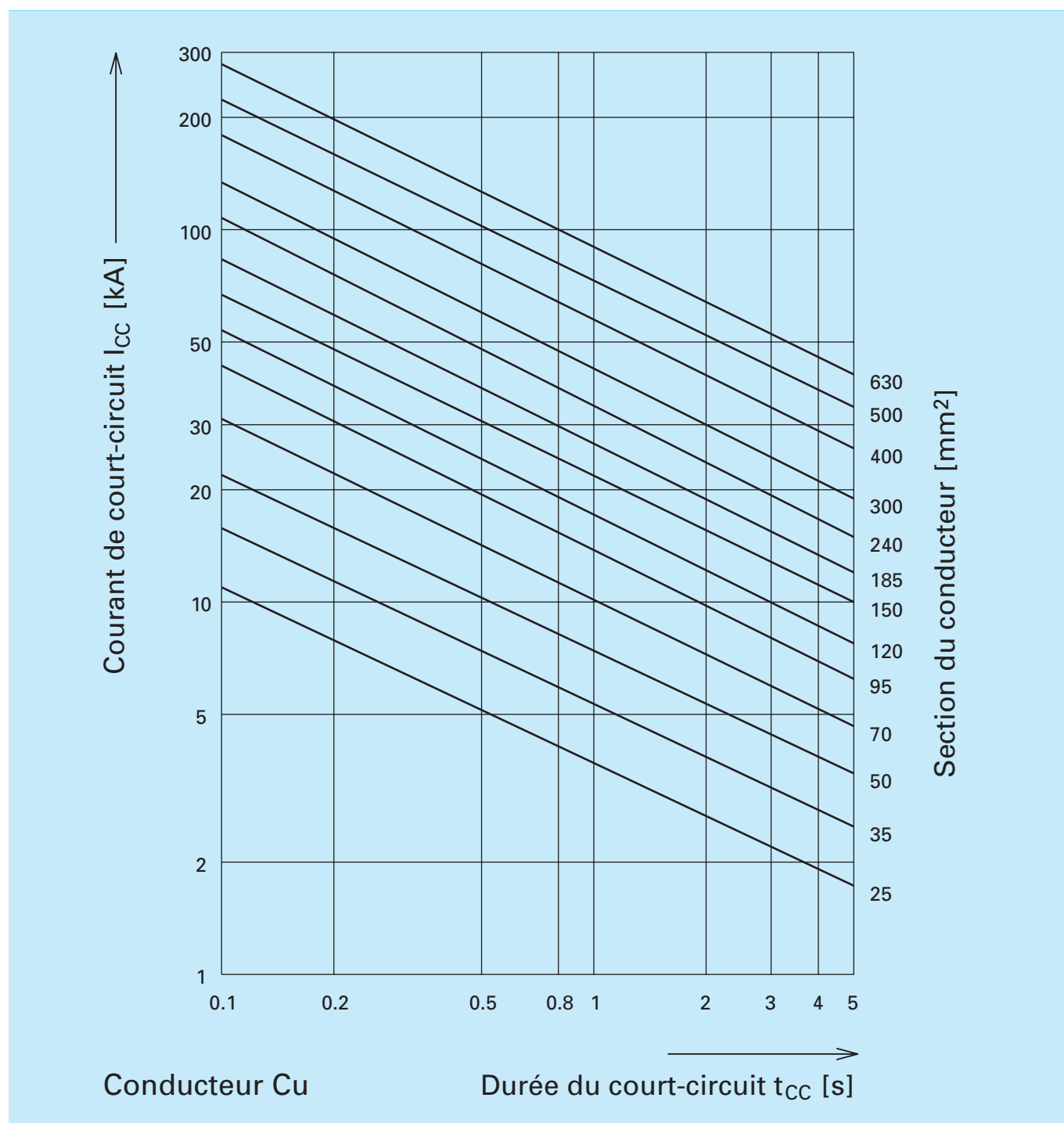


Figure 3: Détermination des courants de courts-circuits autorisés pour les conducteurs en cuivre.

Température permanente du conducteur au début du court-circuit: 90 °C

Température autorisée à la fin du court-circuit: 250 °C

On atteint la limite de la contrainte dynamique lors de courants de court-circuit > 40 kA. Pour des courants de court-circuit plus importants, il faut utiliser des brides de fixation et des attaches pour câbles selon les indications calculées.

Informations générales

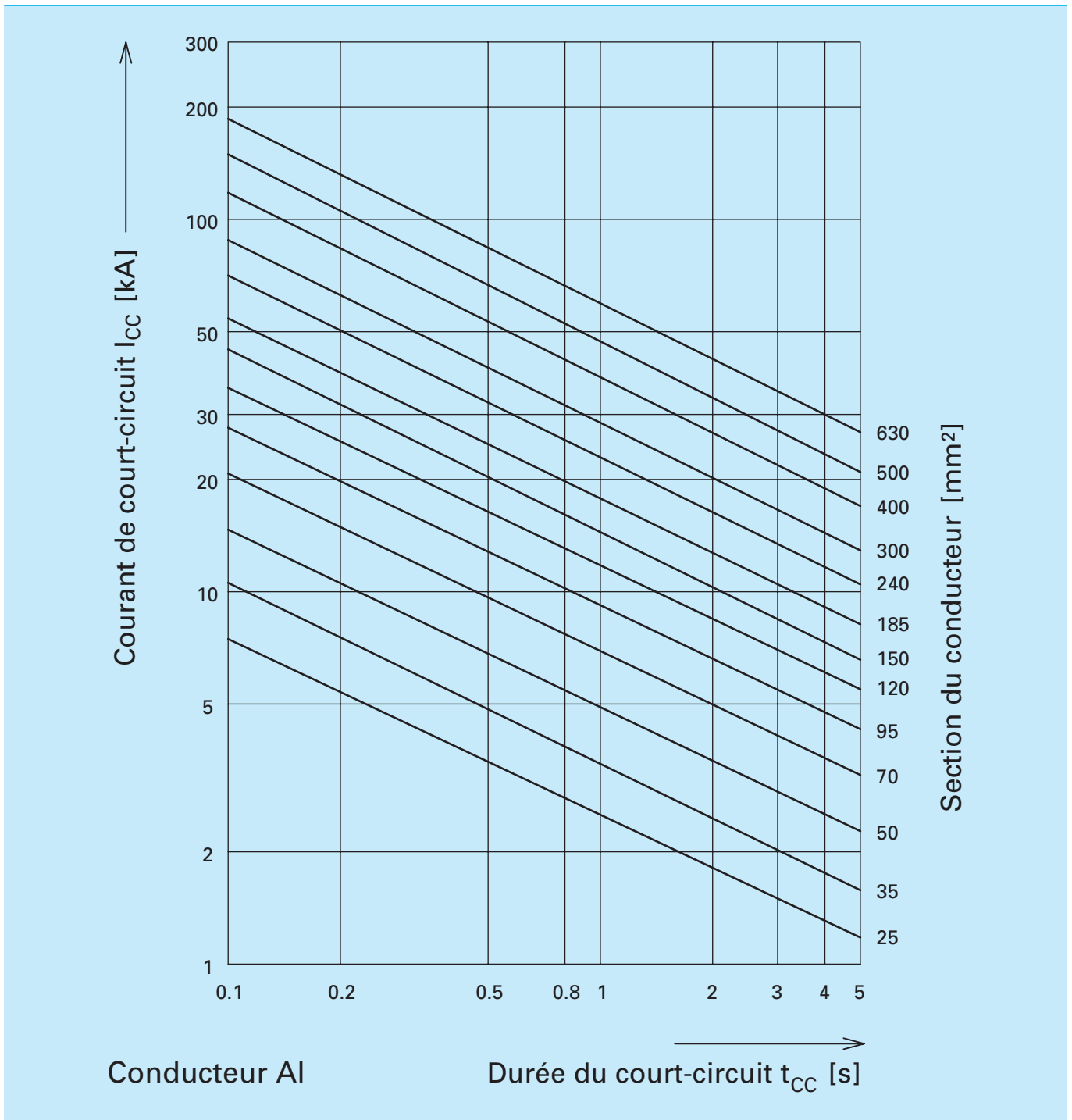


Figure 4: Détermination des courants de courts-circuits autorisés pour les conducteurs en aluminium.

Température permanente du conducteur au début du court-circuit: 90 °C
 Température autorisée à la fin du court-circuit: 250 °C

On atteint la limite de la contrainte dynamique lors de courants de court-circuit > 40 kA. Pour des courants de court-circuit plus importants il faut utiliser des brides de fixation et des attaches pour câbles selon les indications calculées.

Informations générales

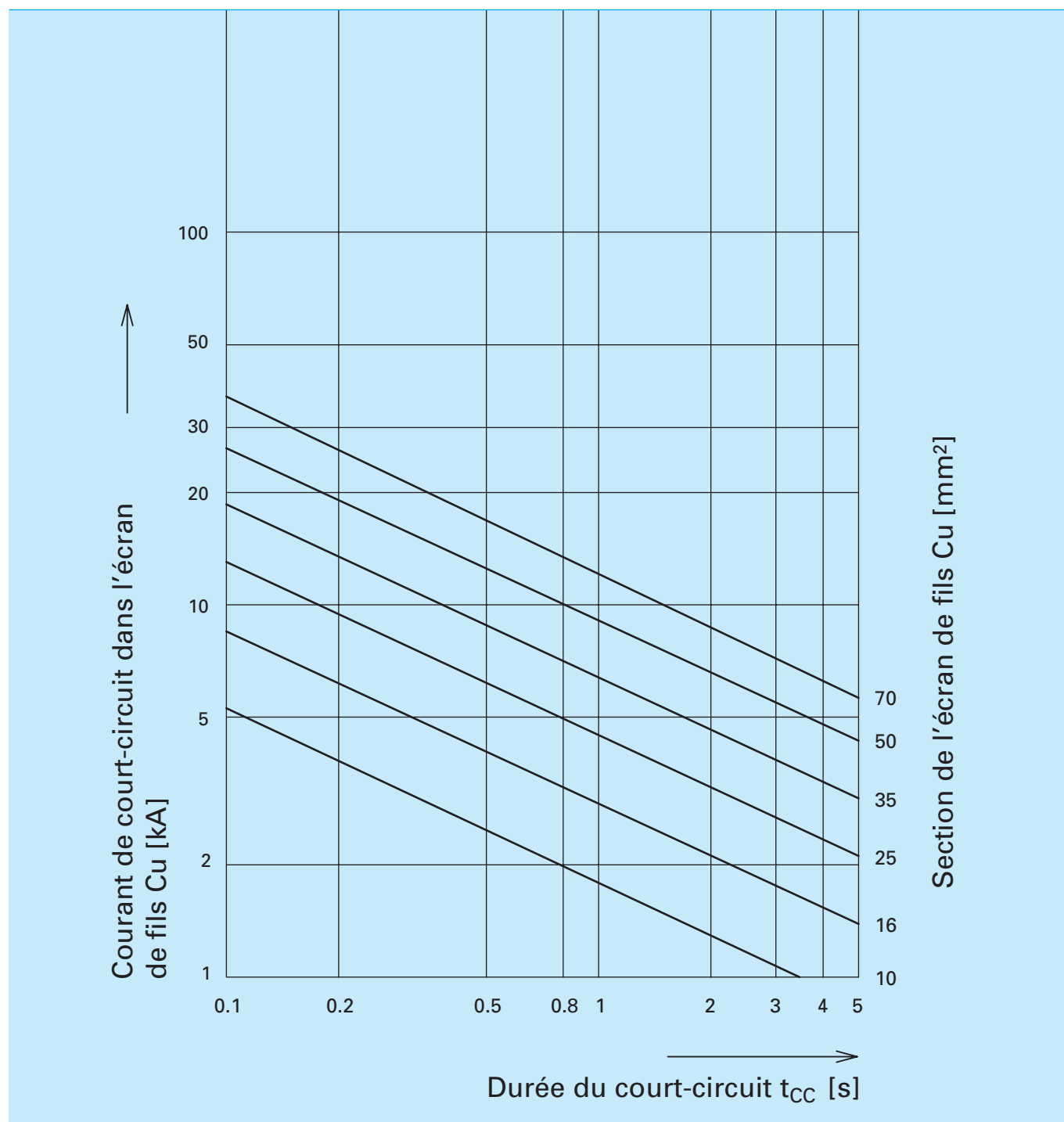


Figure 5: Courants de courts-circuits autorisés dans les écrans de fils de cuivre ronds.

Température permanente de l'écran au début du court-circuit: 50 °C
Température d'écran autorisée à la fin du court-circuit: 250 °C

Informations générales

3.4 Contrainte dynamique des câbles

La contrainte dynamique des câbles peut se calculer à partir du courant maximal asymétrique de court-circuit.

$$I_S = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_{CC}$$

I_S = courant maximal asymétrique de court-circuit [A]

k = facteur de choc (simplifié 1.8)

I_{CC} = courant de court-circuit [A]

La force dynamique, qu'un ruban enroulé a à supporter est de:

$$F_B' = \beta \cdot \frac{\mu_0 \cdot I_S^2}{2\pi \cdot s} \quad [\text{N/m}]$$

F_B' = contrainte radiale [N/m]

β = facteur d'ordre pour

pose en nappe $\beta = 0.404$

pose en triangle $\beta = 0.5$

μ_0 = constante d'induction = $4\pi \cdot 10^{-7}$ [N/A²]

s = distance entre les axes des conducteurs [m]

ou simplifié avec $k = 1.8$:

$$F_B' = 1.3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\beta \cdot I_{CC}^2}{s} \quad [\text{N/m}]$$

On atteint la limite de la contrainte dynamique lors de courants de court-circuit supérieurs à 40 kA. Les câbles multipolaires assemblés supportent les forces de court-circuit essentiellement sans dommages. Les câbles monophasés et les extrémités des conducteurs séparés des câbles multipolaires doivent être fixés à courts intervalles par des brides et des attaches à câbles. Brugg Cables possède les programmes de calcul nécessaires.

3.5 Pose des câbles dans le sol

Un câble posé dans le sol ne peut évacuer la chaleur due aux pertes que grâce à son environnement. La résistance thermique spécifique du sol ρ_E a une importance majeure pour l'évacuation thermique. Ce sont la densité et le taux d'humidité du sol environnant qui déterminent cette valeur ρ_E . La résistance thermique spécifique du sol varie fortement selon son taux d'humidité. Dans un état sec, cette valeur est environ le double de la valeur que dans un état humide. La résistance thermique diminue avec l'augmentation de la densité du sol.

Dans un environnement non perturbé, la majorité des sols possèdent une résistance thermique spécifique de 0.6–0.8 K·m/W. En tenant compte de la dépendance entre température et humidité, la valeur limite $\rho_E = 1 \text{ K} \cdot \text{m/W}$ est bien choisie. Cette valeur correspond aux normes IEC 60287.

Le béton a une résistance thermique spécifique basse et est relativement peu dépendant de l'humidité. La surface de contact au sol est agrandie par un bloc de tubes en béton, ce qui améliore l'évacuation de la chaleur.

3.6 Conditions pour le calcul de limite de charge

Pose dans le sol, directement dans la terre ou dans des tubes

Calcul pour un système de câblage

– Service de longue durée	24 h 100 %
Facteur de charge	BG = 1
Facteur de perte	LF = 1
– Charge industrielle	10 h 100 %, 14 h 60 %
Facteur de charge	BG = 0.767
Facteur de perte	LF = 0.627
– Température du conducteur	60 °C, 90 °C
– Profondeur de pose	1 m
– Température du sol	20 °C
– Résistance thermique spécifique du sol	1 K·m/W

Pose à l'air libre

Calcul pour un système de câblage

– Service de longue durée	24 h 100 %
Facteur d'utilisation	LF = 1
– Température du conducteur	60 °C, 90 °C
– Température de l'air	30 °C

3.7 Détermination de la section

La section du conducteur peut être déterminée comme suit:

1. Calcul du courant de fonctionnement à partir de la puissance à transporter:

$$I_B = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}$$

I_B = courant de fonctionnement [A]

S = puissance à transporter [kVA]

U = tension du réseau composée [kV]

2. Déterminer le type de pose (dans le sol, dans des tubes ou directement dans la terre, à l'air libre).
3. Déterminer le type de mise à la terre de l'écran.
4. Pour des variantes à des conditions normales: tenir compte des facteurs de correction selon le chapitre 4.
5. Déterminer la section du conducteur à partir des tableaux de capacité de charge.
6. Câble de moyenne tension: contrôler la résistance aux courts-circuits de la section choisie des conducteurs et de l'écran métallique. La section est éventuellement à augmenter à cause de la résistance aux courts-circuits.

Calcul du courant de court-circuit à partir de la puissance de court-circuit:

$$I_{CC} = \frac{S_{CC}}{\sqrt{3} \cdot U}$$

I_{CC} = courant de court-circuit [kA]

S_{CC} = puissance du courant de court-circuit alternatif [MVA]

U = tension du réseau composée [kV]

Informations générales

- Câble à basse tension: la chute de tension est à calculer pour une section choisie et à comparer aux directives. Selon le résultat, il faut choisir une section plus grande.
- Détermination de la section du point de vue économique du conducteur selon le chapitre 5.

4. Tableaux et facteurs de corrections

4.1 Résistances de conducteurs maximales pour courant continu selon IEC 60288 à une température de conducteur de 20 °C

Section du conducteur mm ²	Cuivre	Aluminium
	Ω/km	Ω/km
1.5	12.10	—
2.5	7.41	—
4	4.61	—
6	3.08	—
10	1.83	3.08
16	1.15	1.91
25	0.727	1.20
35	0.524	0.868
50	0.387	0.641
70	0.268	0.443
95	0.193	0.320
120	0.153	0.253
150	0.124	0.206
185	0.0991	0.164
240	0.0754	0.125
300	0.0601	0.100
400	0.0470	0.0778
500	0.0366	0.0605
630	0.0283	0.0469
800	0.0221	0.0367

4.2 Facteurs de correction de la résistance maximale du conducteur sous courant continu à des températures supérieures à 20°C

Température du conducteur °C	Facteur $1 + (\alpha_{20} \cdot \Delta\vartheta)$	
	Cuivre	Aluminium
20	1.000	1.000
25	1.020	1.020
30	1.039	1.040
35	1.059	1.060
40	1.079	1.081
45	1.098	1.101
50	1.118	1.121
55	1.138	1.141
60	1.157	1.161
65	1.177	1.182
70	1.196	1.204
75	1.216	1.225
80	1.236	1.245
85	1.255	1.265
90	1.275	1.285
95	1.293	1.305
100	1.314	1.325

4.3 Facteurs de correction de la charge selon la température ambiante

Pose des câbles dans des tubes en plastique en terre

Température du conducteur °C	Température du sol °C			
	10	20	30	40
60	1.10	1.00	0.91	0.87
75	1.08	1.00	0.92	0.86
90	1.07	1.00	0.93	0.85

Pose des câbles à l'air libre

Température du conducteur °C	Température de l'air °C				
	10	20	30	40	50
60	1.35	1.18	1.00	0.79	0.52
75	1.24	1.12	1.00	0.86	0.71
90	1.18	1.09	1.00	0.90	0.79

Il n'y a pas lieu d'appliquer une réduction pour des câbles posés en parallèle à l'air libre (circulation d'air libre), avec un écart entre les câbles > 0.75 x diamètre du câble.

4.4 Facteurs de correction de la charge pour pose en parallèle

Câbles à moyenne tension tripolaires, posés en parallèle dans tubes en plastique, écart entre axes 25 cm

XKDT-Y 3x1x...	Section	
	25-70 mm ²	95-240 mm ²
	0.90	0.85
	0.78	0.75
	0.72	0.70

4.5 Facteurs de correction de la charge selon la résistance thermique spécifique du sol

Pose des câbles dans des tubes en plastique en terre

Section mm ²	Résistance thermique spécifique du sol (K · m/W)						
	0.7	1.0	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0
25 à 95	1.13	1.00	0.94	0.84	0.75	0.68	0.63
120 à 630	1.14	1.00	0.93	0.84	0.73	0.66	0.61

Informations générales

5. Détermination de la section du point de vue économique

Dans les tableaux de capacité de charge sont données les températures maximales permises de fonctionnement. La capacité de charge du point de vue économique est en général inférieure au courant limite thermique. Pour cette raison, il est en général conseillé d'envisager, pour des raisons de rentabilité, une section de conducteur plus grande. L'expérience a montré que le coût supérieur, pour une section de conducteur supérieure, est amorti en peu d'années grâce aux pertes ohmiques inférieures.

La section de conducteur du point de vue économique augmente avec:

- un prix d'achat de l'électricité plus élevé
- une plus longue durée d'utilisation
- une plus longue période d'amortissement
- des taux d'intérêts à la baisse
- la différence de prix d'avec la section supérieure

La section de conducteur du point de vue économique peut être calculée en fonction du prix du câble et des pertes ohmiques économisées et capitalisées. Les calculs peuvent être réalisés, à la demande, avec les programmes de calcul de Brugg Cables.

6. Chute de tension

La chute de tension occupe un rôle significatif pour le choix de la section de câble, avant tout dans les réseaux à basse tension. La chute de tension a un effet réducteur de charge pour des longueurs de câble au-delà d'environ 250 m. On peut schématiquement le représenter de la façon suivante:

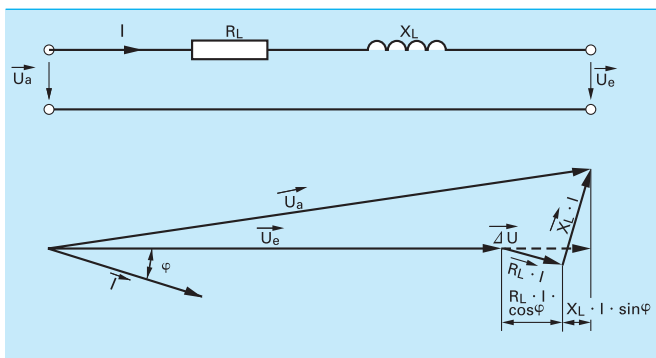


Figure 6: Représentation schématique de la chute de tension.

Dans un réseau d'alimentation bien conçu, la chute de tension entre la sortie secondaire du transformateur de quartier et la boîte de raccordement de la maison devrait être de 3% au maximum. En effet, le fonctionnement sans problème d'appareils sensibles à la tension tels que radios, téléviseurs, appareils à mémoire programmable, lampes, etc., dépend fortement d'une tension constante. Une différence de 5 à 7% n'est acceptable que dans des cas d'exception où des efforts considérables pour la con-

nexion ne sont plus rentables, par exemple pour des acheteurs se trouvant à l'écart. La chute de tension supplémentaire due à l'installation intérieure du bâtiment est estimée à 2% et doit également être prise en considération.

La chute de tension ΔU est donnée en pourcentage de la tension de fonctionnement U . Pour une puissance à transporter P connue, il vaut:

$$\Delta U = \frac{P \cdot L \cdot 100 \cdot (R_w \cdot \cos\varphi + X_L \cdot \sin\varphi)}{U_V^2 \cdot \cos\varphi}$$

ou pour un courant I connu:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot L \cdot 100 \cdot (R_w \cdot \cos\varphi + X_L \cdot \sin\varphi)}{U_V \cdot \cos\varphi}$$

P = puissance à transporter

L = longueur du tracé [km]

R_w = résistance effective de la ligne [Ω /km]

X_L = résistance d'induction de la ligne [Ω /km]

U_V = tension du réseau composée [V]

ΔU = chute de tension [%]

I = courant [A]

φ = angle de phase de la charge

Formule d'approximation pour l'estimation de la chute de tension:

$$\Delta U = \frac{Z_{60} \cdot \sqrt{3} \cdot I \cdot L \cdot 100}{U_V}$$

Z_{60} = impédance à 60 °C et 50 Hz [Ω /km]

Valeurs à voir dans les fiches des câbles

La chute de tension est directement proportionnelle au moment de charge $P \cdot L$. Lors du calcul de la section du conducteur, on peut utiliser pour la tension de fonctionnement $U/U_0 = 400/230$ V (voir figure 7).

Informations générales

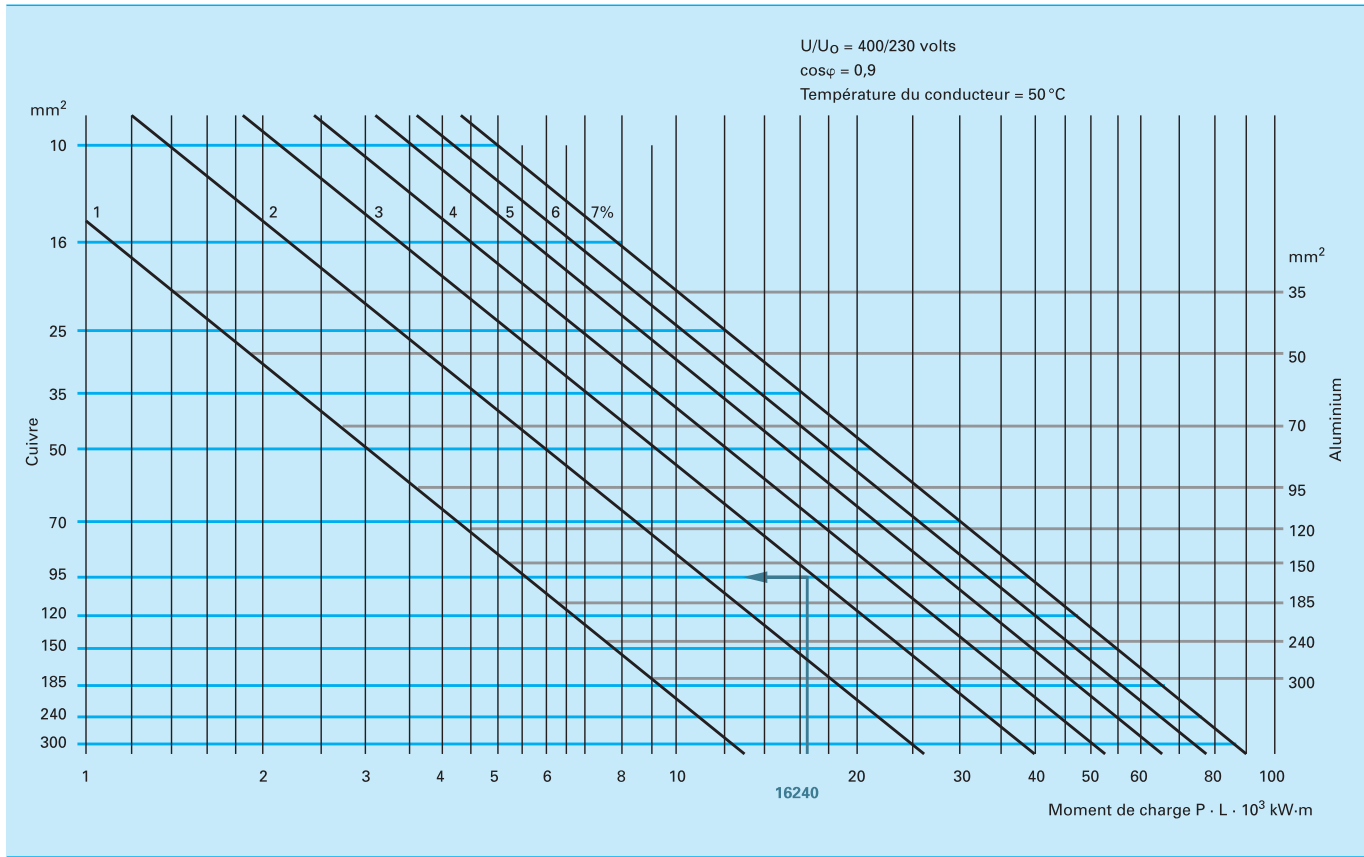


Figure 7: Section du câble en tenant compte de la chute de tension.

Exemple: le cas suivant est donné avec transformateur:

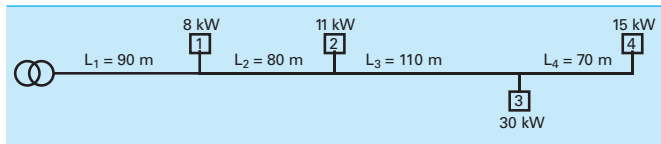


Figure 8: Ligne de basse tension.

Cherché: la section du câble en Cu pour ΔU = 3%

Solution:

1. Calculer les moments de charge

$$\begin{aligned}
 P_1 \cdot L_1 &= 8 \text{ kW} \cdot 90 \text{ m} = 720 \text{ kW} \cdot \text{m} \\
 P_2 \cdot (L_1 + L_2) &= 11 \text{ kW} \cdot 170 \text{ m} = 1870 \text{ kW} \cdot \text{m} \\
 P_3 \cdot (L_1 + L_2 + L_3) &= 30 \text{ kW} \cdot 280 \text{ m} = 8400 \text{ kW} \cdot \text{m} \\
 P_4 \cdot (L_1 + L_2 + L_3 + L_4) &= 15 \text{ kW} \cdot 350 \text{ m} = 5250 \text{ kW} \cdot \text{m} \\
 &= 16240 \text{ kW} \cdot \text{m}
 \end{aligned}$$

2. On peut trouver directement les sections et les valeurs efficaces des chutes de tension à partir du graphique. Dans ce cas:

Cu = 95 mm² et ΔU environ 3.0%.

7. Mise à la terre de l'écran des câbles

Si l'écran n'est mis à la terre que d'un côté, il apparaît, dans l'écran, une tension longitudinale induite par le courant du conducteur. Les écrans de câbles de moyenne tension sont normalement mis à la terre des deux côtés pour des raisons de sécurité. Pour cette raison, il existe un courant dans l'écran créé par la tension longitudinale induite de la gaine. Le courant de l'écran est proportionnel au courant du conducteur. Du fait des grandes pertes par écran ou pour des risques de mise sous tension accidentelle, on conseille la mise à la terre d'un seul côté de l'écran pour des sections de câbles supérieures à 240 mm². Afin, tout de même, d'assurer la sécurité, il faut protéger l'extrémité ouverte de chacune des phases par une parasurtenseur et munir toute l'installation d'un panneau d'avertissement. Le principe de la mise à la terre d'un seul côté est visible sur la figure 9.

Il faut considérer les écrans de câbles et les extrémités des câbles comme étant sous tension. L'installation de parasurtenseur dépend du courant de court-circuit et du genre d'aménagement.

Informations générales

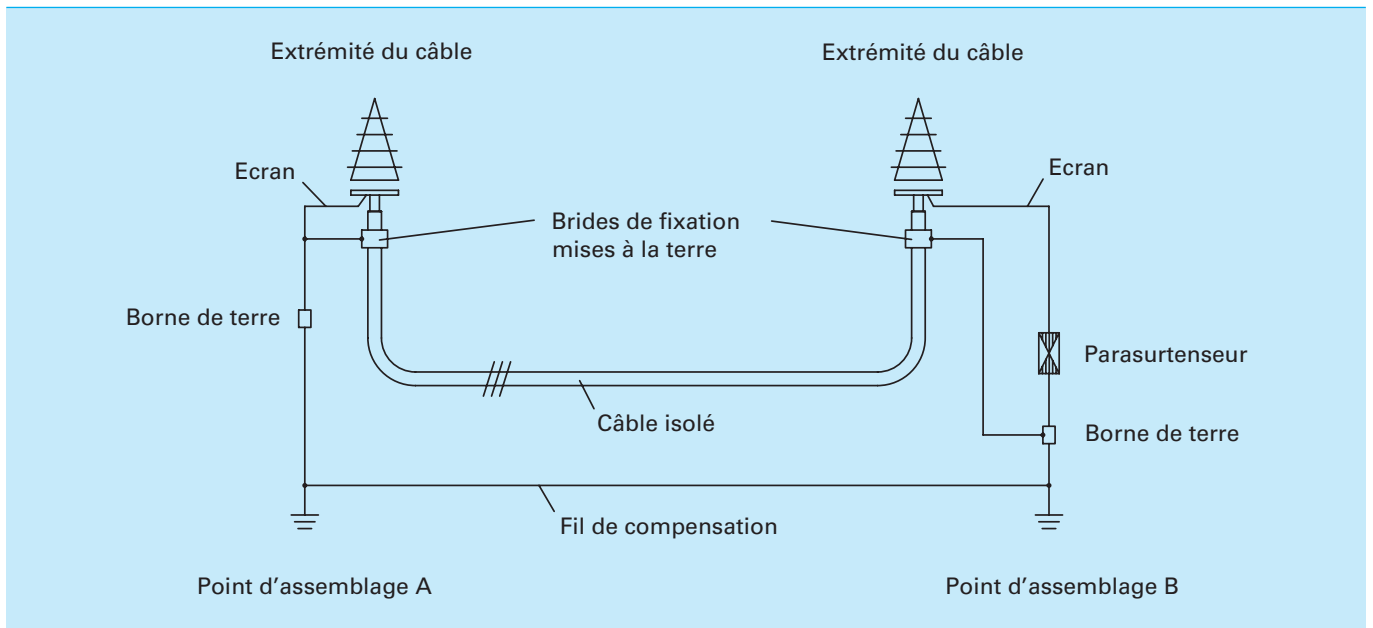


Figure 9: Principe de la mise à terre d'un seul côté de l'écran.

8. Plusieurs câbles par phase branchés en parallèle. Distribution du courant dans le système triphasé

Le branchement en parallèle de câbles s'impose surtout dans la basse tension lorsqu'il faut transporter des courants importants. Ceci compte également pour la moyenne tension lorsque d'importants courants entrent en jeu. La description suivante se rapporte au cas d'un système à basse tension tripolaire avec conducteur neutre.

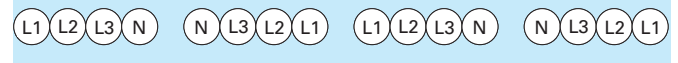
Un câble tri- ou quadripolaire avec un torsadage régulier représente un système parfait, symétrique avec des réactances de phases équilibrées. Par le choix de sections et de longueurs de pose égales, on atteint une très bonne répartition du courant.

Si l'on n'utilise pas de câbles monopolaires torsadés, il est prioritaire de veiller à ce que les inductions des conducteurs en parallèle de chaque phase aient la même grandeur. Cela peut être réalisé par un agencement symétrique des phases par rapport à un point ou à un axe. Chaque conducteur est dans ce cas soumis à la même réaction (induction mutuelle) de la part de tous les autres conducteurs.

On peut normalement atteindre une très bonne symétrie et une très bonne répartition du courant avec deux ou quatre systèmes parallèles (lignes). Pour un système avec trois conducteurs en parallèle, on conseille un agencement en triangle. Il est très important d'organiser chaque ligne d'un système en parallèle selon l'ordonnance L1, L2, L3, N qui est posé avantageusement en contact.

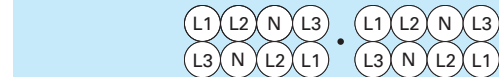
Agencement de câbles monopolaires avec 2 ou 4 systèmes de câbles en parallèle:

en nappe



symétrie axiale

en carré (ou triangle)



symétrie ponctuelle

Figure 12: Agencement de câbles monopolaires.

Informations générales

9. RRNI et compatibilité électromagnétique

RRNI signifie: «règlement de rayonnement non ionisants»
Le rayonnement électromagnétique fait partie de ces rayonnements non ionisants.

Les câbles de réseaux de basse et moyenne tension possèdent tous un écran, qu'ils soient mono-, tri- ou quadripolaires. Cet écran est à mettre à la terre au moins d'un côté et pour une meilleure sécurité des deux côtés. Par cette mise à la terre, le potentiel est mis à zéro. Du côté interne de l'écran, le conducteur produit un champ électrique dépendant de sa tension de fonctionnement et à l'extérieur de l'écran le rayonnement électromagnétique est nul. Les câbles sans écran ne présentent pas cet avantage; on rencontre ce genre de câbles dans la basse tension, et alors la tolérance aux ondes électromagnétiques (EMV) doit être jugée spécialement.

Les câbles de basse tension triphasés et quadripolaires de même que les câbles monophasés à basse et moyenne tension enterrés dans un tube ne nécessitent pas de certification NISV. Les faibles écarts entre les trois conducteurs de phase ne produisent que peu de champs électromagnétiques (EMF), ils sont jugés noncritiques.

Rayonnement magnétique

Les rayonnements magnétiques des câbles à moyenne tension sont très rarement importants, i.e. au-delà de $1 \mu\text{T}$ (1 microtesla). De très forts champs magnétiques peuvent apparaître aux sorties basse tension des transformateurs avec de hauts courants ou à la sortie des barres collectrices. Dans ces cas, il est très important de réaliser un agencement géométrique des câbles monopolaires physiquement correct et techniquement optimal. Il est extrêmement important d'appliquer, dans la pratique, les règles de pose et de montage indiqués dans le sous-chapitre «Distribution du courant dans le système triphasé». L'expérience a aussi montré que quatre câbles monophasés L1, L2, L3 et N assemblés en un câble quadripolaire symétrique, produisent les plus faibles déviations en ce qui concerne la repartition d'électricité des conducteurs de phase enclenchés parallèlement.